

編按：日本核災後，台灣對核安問題關注上升，在一片質疑聲中，我們刊登談核能的文章似乎有點不識實務，要說的是本文提到的核能技術，跟現有核電運轉所用的是不同的，而且也是各國正在全力研究的新能源，除了反對現有核電廠之外，如何規劃新的能源技術來替代現有能源技術，恐怕也是贊成與反對核電廠陣營所必須面對的。因此如果讀者看到標題就覺得反感，不妨耐著性子看完整篇文章，或許可以有些想法。

## 壹、世界能源供給與需求

能源是現代文明的基礎，各種人類使用的能源之中又以化石能源為主。根據2010年的統計，世界能源的使用有超過80%來自化石能源(煤、石油、天然氣等)。然而化石能源將會耗盡，依據保守的估計，煤約有使用200年的儲藏量，天然氣約有使用60年的儲藏量，而石油約只有使用40年的儲藏量。從全球能源消耗的趨勢來看，消耗量從1970年至2008年間成長了2.5倍。然而這種能源消耗的成長沒有減緩趨勢，預計到2050年時人口達百億，能源的消耗還會再成長為現在的2到3倍左右。以這樣的能源使用速率，專家預估全世界的能源供給將在2050年以前出現短缺，屆時極有可能對人類社會造成巨大衝擊。因此替代能源的開發是二十一世紀的首要問題，也牽動了現今世界各國的能源政策。

## 貳、化石能源對氣候與環境的影響

當人類在消耗化石能源的同時，也對環境產生了全球性的破壞。消耗化石能源會產生二氧化碳，它會造成氣候與環境變異(溫室效應、全球暖化、海平面上升、水災增加、熱浪與暴風雨等)，以致於影響人類的健康與威脅公共安全。即使把所有的石化發電都採用最新的科技予以減碳，到2100年大氣的二氧化碳含量仍將再增為2倍，如此必然會引發氣候與環境的重大變化。若要滿足能源需求又要避免二氧化碳增加，唯一方法就是使用非化石能源，也就是要提升「再生能源」與「核能」的使用比率。再生能源(風力發電、太陽能、水力發電、地熱發電、海浪發電、潮汐發電及生質能源等)是目前對環境最友善的一種能源方案，各先進國家也積極的為再生能源開發新的技術。然而，再生能源的發展有其先天的限制，故未被世界各國視為未來的主力能源。

## 參、核分裂能源的供給與需求狀況

核能是另一種不產生碳的能源。使質量較大而不穩定的原子核(如鈾)分裂成質量較小原子核，稱之為「核分裂反應」，在核分裂的過程中一部分的質量轉變成能量。現今所有運轉中的核能電廠皆是以「核分裂」的方式來產生能源。核分裂能源的主要缺點是核燃料與核廢料的輻射有一千年以上的半生期，因此核燃料與核廢料的外洩會對環境與生態造成嚴重的影響，但目前仍無妥適的核廢料處理方法。

從世界核分裂反應器的數目可以看出核分裂能源的發展趨勢。自1980年至2005年間，興建中的核分裂反應器從每年200個遞減至每年30個左右。然而溫室效應與氣候變遷問題使得世界各國重新檢視核能電廠的必要性，因此近年來紛紛啟動新建以及進行舊核能電廠延壽計畫，2005年之後興建中的核反應器數目又開始爬升。根據國際原子能總署(IAEA)在2010年的統計資料，全球有441個核分裂反應器在進行運轉，5個除役，61個興建中(含台灣核四的兩個反應器)。目前核能發電佔全世界電力供應的14%，總能源供應的5.7%左右。全球核能所佔的發電量比例正在穩

定的成長。以2005年為例，全球產出的鈾為四萬兩千噸，但核分裂燃料的消耗量卻為六萬七千噸，多出來的部份是靠鈾與鈾的循環再利用所提升的數字。至於全世界鈾的總蘊藏量，大約有五百到一千萬噸左右(經濟合作暨發展組織(OECD)於2006年的估計)，如果不使用滋生反應爐技術，核分裂燃料只約有使用100年的儲藏量。使用「滋生核分裂反應爐」應可延長核分裂燃料的供應至一千年以上，但是使用「滋生核分裂反應爐」可以產生核武器之原料，會造成國際安全與和平的疑慮。

#### 肆、台灣能源的供給與需求

台灣每年所消耗的能源約相當於6億桶石油，然而石油與天然氣的總蘊藏量卻只有相當於5億桶石油的份量而已。過去20年期間，台灣的能源供給量每年成長約5%左右，但由於自產能源缺乏，台灣約有99%以上的能源來自於進口，而進口的能源有一半以上作為電力供給使用。目前各種能源所佔的發電比例為：燃煤52%、燃氣20%、核能18%、燃油3.9%、再生能源3%。能源政策的規劃為國家發展的重要課題，必須要有長遠與合理的規劃。目前政府投資於再生能源(風力發電、太陽能、水力發電、地熱發電、海浪發電、潮汐發電及生質能源等)的研發，而且將目標設定在2050年以前，再生能源要供給約30%能源需求。樂觀的說，就算能夠成功達到目標，還有70%不足的能源必須倚賴「化石燃料」及「核能」。化石燃料會產生二氧化碳並製造溫室效應。行動的碳監視學會(CARMA)在2007年的一項調查顯示，台中火力發電廠的碳排放量是世界第一，雲林麥寮廠則排名第五。而在2005年「京都議定書」生效後，台灣即面臨二氧化碳排放必須逐年遞減的沉重壓力。

#### 伍、核融合能源是友善環境的永續能源

「核融合反應」是太陽發光發熱的能量來源。「核融合反應」是使質量較小的原子核融合在一起成為質量較大的原子核，在核融合的過程一部分的質量轉變成能量。氘核子同位素氘(deuterium)與氚(tritium)的核融合反應機率最大，是最容易實現的核融合反應。約2億度高溫的氘和氚核子發生核融合後，會融合成約350億度高能量的氦原子核與約1450億度高能量的中子。產生的能量約為原來氘與氚能量的450倍。「核融合」發電能改善「核分裂」發電的三項缺點。第一，核融合的燃料(氘和氚)很容易取得，氘可以從海水提煉，每一公升海水中含三十毫克氘。雖然，氚不存在於自然界中，但可以從中子與鋰元素的核反應提煉，因此核融合的氘及氚燃料是幾乎取之不盡的。

第二，核融合的燃料以及反應後的產物都是非放射性物質，不會產生二氧化碳或造成空氣污染，不會有大量的核能廢料，故沒有核廢料處理的難解技術與政治問題。第三，核融合裝置內是密度稀薄的電漿，其中的電漿粒子密度約只有空氣密度的十萬分之一而已，無需大量集中燃料。只要減少燃料供給，核融合反應可以隨時終止，其控制性比現行核分裂反應器要容易，故核融合反應爐不可能熔毀，也不可能大型能量釋放失控的危險。

與目前所知的所有能源相比較，氘與氚的核融合能源不僅燃料充足，又不產生溫室氣體及高放射性且半生期超過千年的核廢料，因此核融合是最友善環境的永續能源，極有可能成為人類能源的最終解決方案。

在21世紀，世界能源與環境問題將會更趨嚴重，因此人類所面對的兩項最重要的挑戰，就是能源與環境。於是尋求另一種充足且無污染的能量來源，已成為世界各國的共識。核融合能源對氣候與環境幾乎沒有衝擊，將會是取代化石能源，供給人類潔淨能源的最好選項。因此，現在

世界各國正積極的發展「核融合」技術，並且期待它成為未來乾淨的能源主力。

## 陸、核融合能源研究

自1950年代以來，以磁場控制核融合的理論基礎、實驗技術以及工程知識都已逐漸成熟。磁控核融合研究是以強磁場控制高溫的氘與氚電漿於一特定的空間，以進行核融合反應。各種磁控核融合的裝置中，以稱為「托卡馬克」(tokamak)的電漿約束裝置的發展較為先進。托卡馬克的構造是以一個甜甜圈狀的環形磁場容器，利用強大的磁場來約束電漿粒子(游離化的帶電粒子)在環形容器裡面的運動。經過數十年的研究，已可控制核融合反應以緩慢的方式釋放能量，托卡馬克實驗產生的功率已從1975年的0.01瓦增加到1995年的5000萬瓦。

要達成核融合能源供給的目標必須要克服兩個主要的課題。第一個課題是要設計較好的核融合反應爐磁場結構，達到以較弱的磁場和較少的能量輸入功率，來維持或增加核融合反應爐內的電漿總能量，尤其更要能夠控制電漿分佈與核融合反應的速率，使核融合反應能自行持續進行。因此必須建造一座能夠自行持續核融合反應的實驗裝置，研究相關科學、技術以及工程知識，並驗證自行持續核融合反應實驗裝置的可行性。第二個課題是要有能夠長期承受強烈中子轟擊的核融合反應爐結構材料。目前使用的材料在長期受到中子或高能粒子轟擊之下，會造成反應爐結構弱化且具放射性。針對此問題，必須建立中子源設施來進行研發能夠承受長期中子轟擊的新物質材料。

目前世界各先進國家都有長期的核融合研究計劃，包括：日本的JT-60計劃，歐洲共同體的JET計劃，韓國的KSTAR計劃，以及美國的幾個核融合實驗裝置。尤其是，歐盟、日本、美國、俄國、韓國、中國及印度於2005年達成協議合作的「國際熱核實驗反應爐(ITER)」計劃，共同投資100億歐元，於法國南部卡達哈希村興建能產生五億瓦功率的ITER核融合實驗裝置(見圖一)，並且預計於2018年建造完成並開始運作。

ITER是繼國際太空站、伽利略全球衛星導航定位系統等之後另一超大型國際科技合作計劃。ITER計劃的目標是建造第一座能夠自行持續核融合反應的托卡馬克實驗裝置，取得相關科學、技術以及工程知識，以評估開發核融合能源的可行性，為商用核融合反應爐做示範驗證。在實現核融合能源科技的道路上，它是印證核融合能源科技可行性的下一重要關鍵步驟。由於現階段技術的進展以及對核融合物理機制的了解，科學家已有足夠的信心能成功地興建與運轉ITER。ITER的技術目標是成功地達到維持核融合反應所必需的5千萬瓦輸入功率，並能產生5億瓦的輸出功率。為了能了解其中燃燒電漿的物理機制，ITER的裝置能保持至少500秒的運轉。ITER本身並沒有發電的設計，其主要目的是驗證利用核融合能大規模商業發電的科學與技術可行性。

儘管一般認為，至少還需要經過30~50年，才能把核融合技術商業化，實現成本效益，但參與ITER的國家將在未來二十年投資期內取得高科技，對帶動其國內高科技的研發和相關產業的提升，具有十分重要的影響。以目前核融合能源科技的發展進程，有幾個國家已經著手計畫在ITER達到運轉目標之後，開始建造能夠大量發電的示範托卡馬克核融合反應爐，預計於2030年代開始運轉，而可以商業化大量發電的磁控核融合發電廠也預計會在2050年代開始運轉。然而必須強調的是，如果有更多的資源投入磁控核融合研究，則以上的時間表將會更快。如果第一座商業用途的核融合電廠能於21世紀中實現，將能夠大幅紓解能源與環境問題。

近10多年來，韓國在核融合研究亦投下了相當多的資源，除了在ITER的興建有10%的投資，韓國政府與企業各投資了五億美元，共同興建的「韓星超導托卡馬克裝置(KSTAR)」也在2008

年初完成，於2008年6月首次產生電漿，而且將能讓電漿電流脈衝維持300秒運轉。這表示韓國除了可以製造托卡馬克的高科技零組件，並已經有了整合大型高科技系統的能力，這種積極與魄力充分的表現出一個國家長期發展規劃應有的遠見。對於國際合作的ITER的建置，韓國將提供10種主要零組件。ITER 預計於2018年興建完成，在此之前，KSTAR將是世界上研究核融合反應器中熱電漿物理機制的主要裝置之一。

## 柒、台灣的核融合能源科技研究

我們可以看到，近年來許多開發國家(歐盟、日本、美國、俄羅斯)與開發中國家(韓國、中國、印度)正致力於核融合科學與技術的研發。2008年2月，美國國家工程學院提出核融合為人類21世紀科技工程的一大挑戰，核融合研究涉及許多新的高科技技術，會帶動高附加價值的新科技，如果核融合發電成功，將會是21世紀新的工業革命。尤其韓國已大量投入核融合科技研究，並且因此具備有整合大型高科技系統的能力。台灣呢？

台灣政府至今仍不了解核融合科技研究的迫切性，也沒有推動大型高科技系統的魄力與決心，所以台灣現在幾乎沒有核融合的研究投資。目前在台灣的電漿研究領域，包含：太空物理、核融合、實驗室電漿、雷射與電漿作用、微波產生、電漿塵、工業電漿應用，低溫電漿等。其中有少數科學家受過核融合電漿科學方面的訓練。然而，研究核融合電漿物理相關的理論、實驗、偵測，或技術並沒有受到政府的重視，投入的資源遠較其他國家落後許多。只有成功大學「電漿與太空科學中心」，以學校提供的少許資源從事發展磁控核融合電漿現象的量測實驗、理論和模擬等研究。

核融合反應器牽涉到許多理論與技術的前端研究。不像核分裂的電廠那樣簡單，核融合反應器的運轉過程中需要多階段的程序與調節，因此必須在電漿科學家、工程師與材料科學家的合作之下才能順利運行。所以，未來若核融合反應器能成功，台灣若僅僅是向國外進口反應器，建置後恐怕也無法運作。因此台灣必須盡快投入核融合研究、設立國家核融合研究中心、建立獨立自主的尖端核融合電漿科學與最先進科技、培養核融合能源研究的科技人才，為未來的核融合反應爐之設計、建造與操作能力做準備。

在政策面上，台灣政府應該讓人民理解全球能源供給將出現短缺的嚴重性，以及台灣必須盡快達到能源自給自足的急迫性，並盡快制定國家能源政策的法律，推行包含核融合在內的能源研發計畫，以保證在本世紀內達到國家能源的自給自足，如此才能幫助台灣度過能源危機。

作者陳秋榮、周晁光國立成功大學電漿與太空科學中心教授  
(本文僅代表作者個人意見，不代表本智庫立場)